

西北太平洋副热带高压的不同指数及其与中国东部夏季降水关系的探讨

聂俊^{1,2} 刘鹏^{1*} 赵灿^{1,3}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京大学大气科学学院, 南京 210023

3 陕西省气候中心, 西安 710014

摘要: 本文利用再分析资料与台站降水资料, 比较了不同副高指数的变化特征, 分析了不同指数与中国东部夏季降水的关系及相应环流变化。结果表明, 副高指数可分为三类: 绝对强度指数、相对强度指数和南北指数。绝对强度指数有上升趋势, 对应 5870gpm 等值线向西的扩张; 相对强度指数有下降趋势, 对应扰动位势 0 线的缩小; 南北指数无明显趋势变化, 表现为副高脊线基本围绕 25° N 振荡。不同副高指数对应的环流与降水异常表明, 绝对强度指数虽然不能较好的描述副高局地的涡度变化, 但其与东亚 EAP 型遥相关关系较好, 在这种情况下, 该指数与长江流域降水存在高相关, 指数正异常时, 华北偏干, 长江中下游水汽辐合降水增加; 反之降水型相反。相对强度指数能较好的描述副高局地的涡度变化, 但其与 EAP 型遥相关关系较弱, 因此相对强度指数与降水关系较弱, 指数正异常时, 降水中心仅出现在长江中游; 反之, 受异常偏北风影响, 我国降水体现为北旱南涝。南北指数对副高局地的涡度变化以及 EAP 型遥相关都有较好表征, 该指数与长江以南以及华北的降水有较好的相关性, 指数正异常时, 水汽大量向北运输, 造成华北多雨而长江干旱; 反之, 相反的环境型使雨带移至华南。

关键词: 副高指数; 夏季降水分布; 环流变化

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20160

收稿日期 2020-05-28; **网络预出版日期**

资助项目 国家重点研发计划专项项目 2016YFA0600402

Funded by National Key Research and Development Program of China 2016YFA0600402

作者简介 聂俊, 男, 1999 年 3 月出生, 主要研究方向为季风与海气相互作用。E-mail:

niejun1999@163.com

通讯作者 刘鹏, E-mail: liupeng1998@nuist.edu.cn

Research on the Relationship between Different Western North Pacific Subtropical High Indexes and Summer Precipitation in Eastern China

Nie Jun^{1,2} Liu Peng^{1*} Zhao Can^{1,3}

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

3 Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014

Abstract: Based on the reanalysis data and monthly precipitation data, in this study, we investigate variabilities of western North Pacific subtropical high indexes (WPSHI), and discuss the relationship between WPSHI and summer precipitation in eastern China and relevant circulation changes. Results show that WPSHI can be divided into three categories, namely, absolute intensity index (ASI), relative intensity index (RLI) and north-south index (NSI). The upward trend in ASI is associated with the expansion of area over 5870gpm. The downward trend in RLI accords well with the shrink of 0gpm line in eddy geopotential height (He). The variation of NSI indicates the ridge of WPSH oscillates around 25°N. Depicted by circulation anomalies and precipitation patterns, ASI can not reflect the variation of local relative vorticity of WPSH, but it has close relationship with EAP pattern. In this case, ASI has the best correlation with precipitation in the Yangtze River Basin. In high ASI years, north wind anomalies is favorable for less rainfall in northern China, while the convergence strengthens the precipitation along the Yangtze River and vice versa. RLI can better describe the variation of local relative vorticity of WPSH, but it has a weaker relationship with the EAP pattern and precipitation in eastern China. In high RLI years, precipitation center appears in the middle reaches of the Yangtze River. Conversely, drought occurs in north of Yangtze river with anomalous north winds over China. NSI can describe both the variation of local relative vorticity of WPSH and the EAP pattern, and has a high correlation with precipitation in southern and northern China. In high NSI years, enhanced vapor flux lead to flood in northern China and drought along Yangtze River. Otherwise, the precipitation is trapped in southern China, resulting from a reversed circulation pattern.

Key words: western North Pacific subtropical high indexes; summer precipitation pattern; circulation anomaly

1 引言

太平洋副热带高压是太平洋上空常年稳定存在的暖性高压系统,其位于西北太平洋的分支——西北太平洋副热带高压(WPSH,以下简称副高),是东亚气候系统的重要组成部分。我国气象学家对副高与东亚气候的研究从20世纪60年代就已开始。研究表明,副高系统常年存在,夏强冬弱,具有多个时间尺度的变化特征(黄士松,1963;周静亚等,1986;刘屹岷和吴国雄,2000; Sui et al., 2007)。在副高的季节性变化中,陶诗言等(1963)指出,副高由冬入夏存在两次北跳过程。伴随着北半球气候系统的调整以及东亚锋区的北移,我国雨带也由南向北推进(徐海明等,2001;陶诗言和卫捷,2006;苏同华和薛峰,2010)。

在年际尺度上,人们发现夏季副高在强度、形状、南北位置上存在多种多样的变化,这些变化不仅影响了东亚地区环流特征,也改变了东亚地区气候状况(罗绍华和金祖辉,1986;蔡学湛等,2003;张玲和智协飞,2010)。在副高强度的变化上,副高异常偏强时,东亚沿岸 30°N 以南的地区被异常反气旋所占据,水汽大量运输至长江流域一带,长江中下游地区往往呈现多雨的状况;副高偏弱时, 30°N 以南的异常反气旋转变为异常的气旋性环流,长江流域降水减少(He et al., 2001; He and Gong, 2002; Ren et al., 2013)。而在副高南北位置变化上,副高的异常偏北将使我国长江中下游流域干旱,雨带异常北移(Huang, 1992),反之雨带靠南。进一步研究发现,这些气候特征的变化,都与东亚-太平洋遥相关型(EAP/PJ)存在密切关系(Nitta, 1987; Huang, 1992; 黄荣辉等, 2011; Huang, 2014)。

而在年代际尺度上,人们注意到自20世纪70年代末以来,副高逐渐加强西伸(He and Gong, 2002; Zhou et al., 2009)。相应的,同期的东亚气候也存在较大的转变(Wang, 2001; Jiang and Wang, 2005; Lee et al., 2017)。Hu等(2003)发现20世纪70年代后,长江流域降水表现出增多的趋势,而我国北方降水表现出减少的趋势,这种南北方降水的趋势变化与东亚沿岸的反气旋式异常有关。21世纪后,高辉等(2015)通过滑动相关指出,副高与长江流域降水之间的相关性迅速减弱,而与华北降水由负相关转变为显著正相关。Huang等(2017)将副高与降水关系变化的原因,归结为与副高相关的海气相互作用关键区的改变。另外,近几年有研究者提出一个全新观点——副高强度存在减弱的趋势(Wu and Wang, 2015; Huang and Li, 2015; He et al., 2018)。这源于以下物理事实:高度场上,相较于其他区域,副高所处地区位势上升较慢(Wu and Wang, 2015);涡度场上,副高控制区域中低层正相对涡度显著增加(Huang and Li, 2015)。这与副高加强的结论有所冲突。而对于副高西伸的结论,有学者认为这是由于全球变暖背景下北半球大面积位势的上升导致的(Wu and Wang, 2015)。

为了更好的表示副高的变化特征,中国国家气候中心(NCCC)发布了逐月的副高面积指数、强度指数、西伸脊点指数、脊线位置指数以及北界位置指数等信息,并将这些指数运用至业务之中。为应对科学研究,刘芸芸等(2012)对这些指数进行了重修订正。总而言之,现有的副高指数可以表征强度或南北位置的变化特征。

在副高强度的变化上,有研究者从特定等高线入手,定义副高面积、强度、西脊点指数

(Huang and Li, 2015)。也有学者从特定区域的位势入手定义副高指数,这其中,众多研究将副高控制地 850hPa 或 500hPa 位势标准差最大的地区 (10°N – 25°N , 120°E – 140°E) 视为副高变化的核心区域,并以此区域平均位势作为副高指数 (Lu, 2002; He and Gong, 2002; Sui et al., 2007; Wang et al., 2013; Huang et al., 2017)。这种指数与西太平洋地区位势高度变化相关性较高,与我国长江中下游流域降水呈显著正相关 (Lu, 2002; He and Gong, 2002)。在随后的发展中,考虑到副高垂直方向上的特征,高辉等 (2017) 将副高的三维空间结构引入到新的副高强度指数定义当中。除位势高度外,也有学者从风场的角度定义副高强度指数。Huang 等 (2010) 从副高南北两侧风速差出发定义副高指数。考虑到反气旋中的梯度风原理, Yang 等 (2017) 将副高脊线上经向风速最大的格点所在经度定义为副高强度指数。在副高的南北变化特征中,同国家气候中心一致,有学者通过计算副高脊线位置平均值作为副高指数。此外,陆日宇提出以副高西北边界所处区域 (30°N – 40°N , 120°E – 150°E) 的平均位势高度作为表征副高南北位置的指数 (Lu, 2002)。

针对前文所述的副高东退减弱的观点,有学者提出利用副高西侧相对涡度平均值来反映副高强度变化 (Yang and Sun, 2003, 2005)。然而这项指数无法直观展示副高控制区域特征。He 等 (2018) 采用扰动位势高度 (He) 来度量探讨副高。在这种观点下,扰动位势特定等值线替代 5880gpm 等值线成为副高的新的边界,副高面积指数、强度指数、西脊点指数得到重新定义。然而,扰动位势下重新定义的副高指数与我国夏季降水的关系并没有得到探讨。位势高度度量下的副高指数与扰动位势高度度量下的指数有何异同,各指数与我国夏季降水有何关系,所对应的大气环流异常又是如何。本文利用大气环流信息以及中国夏季降水的站点资料,将位势高度度量下与扰动位势高度度量下副高面积指数、强度指数、西脊点指数以及脊线指数进行归类,比较了副高指数之间的异同特征。在此之后,本文对不同指数与中国东部夏季降水关系进行探讨。最后,通过分析大气环流异常,解释了降水分布差异的原因。这些研究对于我国夏季降水预测的准确性具有一定的意义。

2 资料与方法

2.1 数据资料与统计方法

本文所选用的数据包括:(1) 国家气候中心提供的 1951-2018 年中国 160 站降水资料;(2) 由美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的 1951-2018 年的再分析资料,包含位势高度场、风场以及比湿数据,分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996)。为获取东亚地区各年份夏季气候状况,本文针对所有物理量求取夏季 (6-8 月) 平均,并选取各物理量 1951-2018 年的平均值为气候态。

2.2 副高指数定义

在位势高度度量下,科学家常采用 5880gpm 等值线来描述副高活动,然而有些年份的天气图上西北太平洋区域并无 5880gpm 等高线,该标准在描述副高活动时存在不连续 (高辉等, 2017)。与此同时,大量文章通过绘制 5870gpm 等值线的变化来描述副高的西伸加强,

He 等（2001）也根据 5870gpm 等值线定义副高指数。因此本文利用 5870gpm 等值线，定义副高指数如下：

- （1） 位势高度度量下副高面积指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，500hPa 位势大于等于 5870gpm 的格点所组成的区域面积之和。
- （2） 位势高度度量下副高强度指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，500hPa 位势大于等于 5870gpm 的格点所组成的区域面积与该点位势相对于 5870gpm 差值的乘积之和。
- （3） 位势高度度量下副高西脊点指数。定义该指数为 90° E- 180° 的区域内，500hPa 位势 5870gpm 等值线最西所到达位置的经度。若西伸脊点所达位置位于 90° E 以西，则使用 90° E 代替。
- （4） 位势高度度量下副高脊线指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，高度场上 500hPa 位势大于等于 5840gpm，风场上 500hPa 纬向风速为 0 ($u = 0$) 且其附近风场呈反气旋式旋转 ($\partial u / \partial y > 0$) 的格点所在纬度的平均值。

在扰动位势高度度量下，本文参考了 He 等（2018）的副高指数定义，采用 500hPa 各格点位势高度与 0° - 40° N 纬圈的平均位势之差作为相应格点的扰动位势，定义副高指数如下：

- （5） 扰动位势高度度量下副高面积指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，500hPa 扰动位势大于等于 0gpm 的格点所组成的区域面积之和。
- （6） 扰动位势高度度量下副高强度指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，500hPa 扰动位势大于等于 0gpm 的格点所组成的区域面积与该点扰动位势的乘积之和。
- （7） 扰动位势高度度量下副高西脊点指数。定义该指数为 90° E- 180° 的区域内，500hPa 扰动位势 0gpm 等值线最西所到达位置的经度。若西伸脊点所达位置位于 90° E 以西，则使用 90° E 代替。
- （8） 扰动位势高度度量下副高脊线指数。定义该指数为 10° N- 80° N, 110° E- 180° 的区域内，高度场上 500hPa 扰动位势大于等于 0gpm，风场上 500hPa 纬向风速为 0 ($u = 0$) 且其附近风场呈反气旋式旋转 ($\partial u / \partial y > 0$) 的格点所在纬度的平均值。

为方便后续研究，本文将位势高度度量下和扰动位势高度度量下的副高面积指数、强度指数放缩至单位球面上。此外对西脊点指数进行中心化处理，并取其相反数，即西脊点指数为正的年份表示该年份夏季副高相对于气候态存在西伸的状况，且数值越大，副高西伸愈加明显，反之亦然。

3 不同副高指数的归类与对比

3.1 不同副高指数的归类

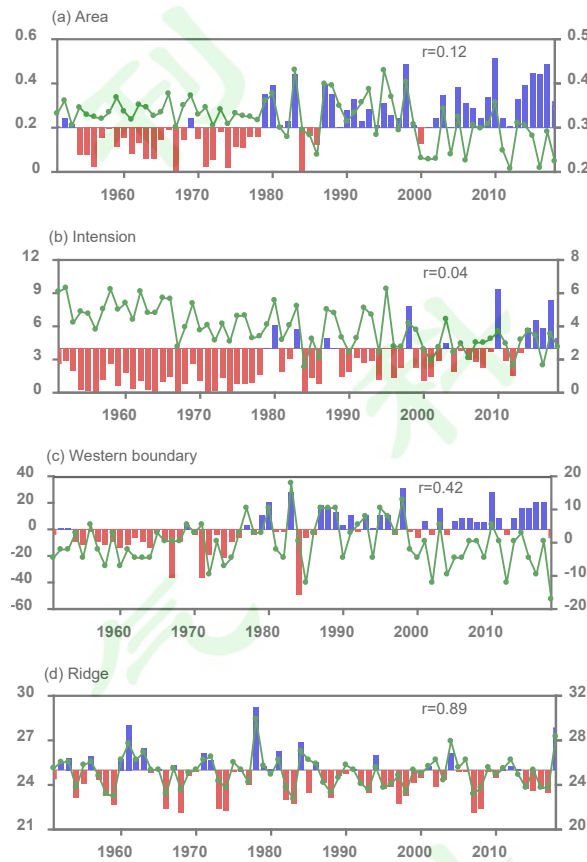


图 1 位势高度度量下（条形图，对应左侧纵坐标）以及扰动位势度量下（折线，对应右侧纵坐标）副高（a）面积指数、（b）强度指数、（c）西脊点指数、（d）脊线指数时间序列。“ r ”为同一图内两组指数之间的相关系数

Fig.1 The time series of the WPSH (a) area indices, (b) intensity indices, (c) western boundary indices, and (d) ridge indices defined by H metric (bars; with left y axis) and He metric (line; with right y axis). “ r ” represent the correlation coefficient between two groups of indices in the same graph

不同度量下定义的副高面积指数、强度指数、西脊点指数以及脊线指数的时间序列如图 1 所示。从图中可看出，在位势高度度量下（图 1 柱状图，对应左侧纵轴），副高面积指数（图 1a）呈现出明显的上升趋势，这种趋势在副高强度指数（图 1b）以及西脊点指数（图 1c）中也有所体现，这表明，从位势高度角度来看，近几十年副高呈现出西伸、扩张、加强的趋势，这与之前研究的结果一致（Zhou et al., 2009）；副高脊线指数的变化趋势并不明显，副高脊线围绕 25°N ，在 20°N - 30°N 的区域内南北振荡（图 1d）。在扰动位势高度度量下（图 1 绿色实线，对应右侧纵轴），副高面积指数与强度指数呈现出逐年下降的趋势，特别是在 20 世纪 80 年代后这种趋势愈加明显；而从副高西脊点指数的变化可以看出，虽然在 80 年代前西脊点指数存在上升的趋势，然而在 1983 年达到顶峰后，西脊点指数也同副高面积指数一致呈现出下降的趋势，说明扰动位势度量下的副高正处于东退、缩小、减弱的状态

当中。而对于副高的南北位置变化，扰动位势度量下的副高脊线指数与位势高度度量下的副高脊线指数变化状况基本一致，两种指数之间的相关系数为 0.89，置信度超过 99%。这种情况可能是因为两种副高脊线指数都以 500hPa 风场作为参考，而大尺度风场是由位势高度的梯度决定的（He et al., 2018）。

表 1 副高指数之间的相关系数
Table 1 The correlation coefficient among different WPSHI

指数		位势高度度量（H）				扰动位势度量（He）			
		面积	强度	西脊点	脊线	面积	强度	西脊点	脊线
		指数	指数	指数	指数	指数	指数	指数	指数
位势高度度量（H）	面积指数	-	0.95**	0.88**	-0.26*	0.12	-0.03	0.25*	-0.33**
	强度指数		-	0.79**	-0.21	0.13	0.04	0.23	-0.29*
	西脊点指数			-	-0.29*	0.21	0.06	0.42**	-0.39**
	脊线指数				-	-0.26*	-0.16	-0.23	0.89**
扰动位势度量（He）	面积指数					-	0.74**	0.71**	-0.43**
	强度指数						-	0.35**	-0.27*
	西脊点指数							-	-0.47**
	脊线指数								-

*代表相关系数置信度超过 95%

**代表相关系数置信度超过 99%

为确定不同副高指数之间的关系，并对这些指数进行归类，我们对不同副高指数之间的相关系数进行了计算。由表 1 可知，在位势高度度量下，副高面积指数、强度指数以及西脊点指数三者之间两两相关系数都超过了 0.7，置信度皆高于 99%。位势高度度量下副高面积指数、强度指数与西脊点指数的同增同减，说明在 500hPa 位势高度上副高的西伸与加强几乎是同时发生的。相比于前三种指数之间的高相关，副高脊线指数与其他三个指数的相关系数皆低于 0.3，副高南北方向上的位置变化与副高强度上的变化直接联系较小。而在扰动位势度量下，虽然副高强度指数与副高西脊点指数之间的相关系数仅达到 0.35，但副高面积指数与强度指数、西脊点之间的相关系数分别为 0.74 与 0.71，置信度都超过了 99%，因此，可以认为在扰动位势度量下这三种指数也呈现一致的变化。此外，扰动位势度量下的脊线指数与同度量下其他指数的相关系数都低于 0.5，说明在扰动位势度量下副高脊线的南北变化与副高的扩张加强等变化关系也较不紧密。

对于两种不同度量下的指数，除了在两种脊线指数上，两者相关系数达到 0.89，表现出高度一致的变化外，其余各指数之间的相关系数都小于 0.5，特别是在两种度量下的面积指数与强度指数之间，它们的相关系数接近于 0，这也说明了，在表征副高强度变化上位势高

度度量与扰动位势高度度量是两种不同的度量体系。相比于位势高度，扰动位势去除了热带大气中区域平均的部分年际-年代际信号，而这种年际-年代际信号可归功于全球变暖影响（Wu and Wang, 2015；He et al., 2018）。因此，位势高度度量下的副高面积指数、强度指数以及西脊点指数包含了全球变暖信号，而扰动位势度量下的副高面积指数、强度指数以及西脊点指数都去除了部分全球变暖信号。

依据前文论述，本文将副高指数分为 3 大类，分别为：

- (1) 绝对强度指数。包括位势高度度量下的副高面积指数、强度指数以及西脊点指数。此类指数通过位势高度，描述副高的绝对强度、绝对面积变化等特征。
- (2) 相对强度指数。包括扰动位势度量下的副高面积指数、强度指数以及西脊点指数。此类指数通过扰动位势高度，描述副高隐藏在 全球变暖下的相对强度、相对面积变化等特征。
- (3) 南北指数。包括两种度量下的脊线指数。此类指数描述副高南北位置变化特征。

为方便讨论，后文将按照这种分类方式，并选取位势高度度量下的副高面积指数代表绝对强度指数，选取扰动位势度量下的副高面积指数代表相对强度指数，选取位势高度度量下的脊线指数代表南北指数，来探讨副高与东亚环流不同变化特征，研究不同副高指数与中国夏季降水之间的关系。

3.2 三类副高指数之间的对比

表 2 1951-2018 年内各类副高指数数值最大 8 年与最低 8 年

	高值年	低值年
绝对强度指数	2010, 1998, 2017, 2015	1984, 1967, 1974, 1956
	1983, 2016, 1987, 2014	1971, 1972, 1964, 1965
相对强度指数	1983, 1995, 1998, 1987	2012, 2016, 2018, 2006
	1988, 1993, 1980, 1966	2001, 2002, 2000, 1986
南北指数	2007, 1968, 1974, 1973	1978, 1961, 2018, 1984
	1966, 2008, 1959, 1983	1963, 1981, 2004, 1971

根据计算，各指数数值最高与最低的 8 年如表 2 所示。根据指数变化状况，绝对强度指数在 2010、1998、2017 年达到最大，而在 1984、1967、1974 年最小；相对强度指数在 1983、1995、1998 年最大，2012、2016、2018 年最小；南北指数在 2007、1968、1974 年最大，1978、1961、2018 年最小。图 2 展示的是各类副高指数数值最高的 3 年与数值最低的 3 年中 500hPa 位势 5870gpm 等值线（或 500hPa 扰动位势 0gpm 等值线）所处状态。由图可知，在气候态上，5870gpm 等值线最西端大约位于 130° E 的经线处，扰动位势 0gpm 线可西伸至我国台湾岛附近，无论是位势高度度量还是扰动位势高度度量，副高脊线都位于 25° N 左右。在绝对强度指数数值最高的 3 年中，5870gpm 等值线所围区域面积明显扩大，等值线可向西延伸至我国华南以及中南半岛地区；而在指数最低的 3 年中，5870gpm 等值线零星的分

布在西北太平洋中，甚至无法在合成的天气图上分析出 5870gpm 等值线。相对强度指数偏高的 3 年中，扰动位势 0gpm 线仅能延伸至中国华南地区；指数偏低的 3 年内，扰动位势 0gpm 等值线东撤至 135° E 左右。相比于 5870gpm 等值线，扰动位势 0gpm 等值线变化范围较小。在南北指数偏大时期，副高脊线北移至 30° N 的地区；而在指数偏低时，副高脊线南退至 20° N 左右，这与前面所分析得到的副高围绕 25° N 进行南北振荡的结论对应。此外，当绝对强度指数与相对强度指数变化时，副高脊线稳定少动，而在南北指数变化时，副高都能西伸至 140° E 左右，说明副高强度类指数与南北指数变化较为独立。

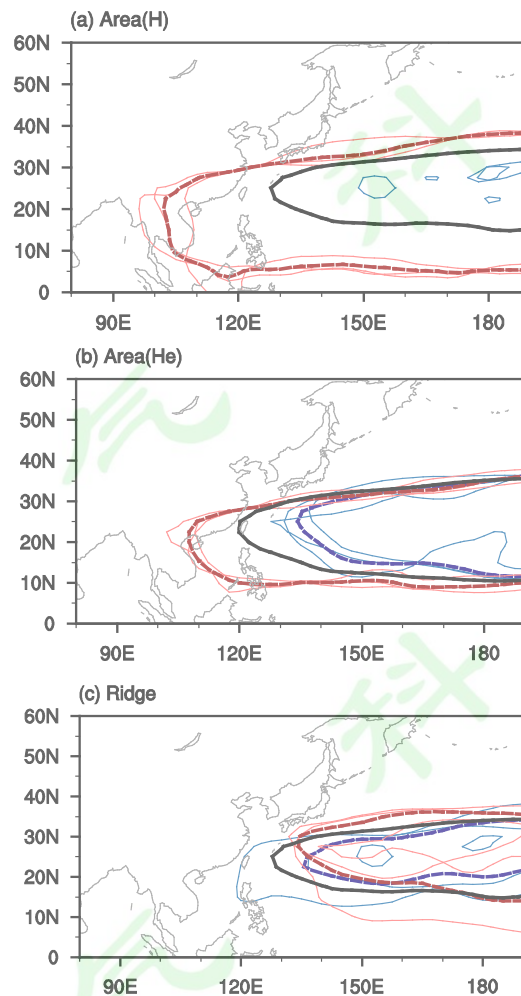


图 2 (a) 绝对强度指数在偏高时 (红色) 以及偏低时 (蓝色) $H=5870\text{gpm}$ 等值线状况; (b) 相对强度指数在偏高与偏低时 $H_e=0\text{gpm}$ 等值线状况; (c) 南北指数在偏高与偏低时 $H=5870\text{gpm}$ 等值线状况。细实线表示指数数值最高 (最低) 3 年相应等值线状况, 粗虚线表示指数数值最高 (最低) 3 年相应等值线平均状态, 黑色实线表示 1951-2018 年相应等值线气候态

Fig.2 (a) $H=5870\text{gpm}$ in high ASI years (red) and low ASI years (blue); (b) $H_e=0\text{gpm}$ in high RLI years and low RLI years; (c) $H=5870\text{gpm}$ in high NSI years and low NSI years. The thin solid line represents the corresponding isoline of indexes in highest (lowest) 3 years. The thick dotted line represents the average state of the corresponding isoline of indexes in the highest (lowest) 3 years. Lines in black indicate climatology results (averaged for the period 1951–2018)

为探讨不同副高指数与大气环流的密切程度, 本文将从副高指数与大气涡度场、位势与扰动位势场以及东亚主要遥相关型之间的关系来进行讨论。对不同副高指数与不同层次副高变化核心区域 (15°N - 25°N , 120°E - 140°E) 平均涡度的相关系数进行计算 (表 3) 表明, 绝对强度指数与区域 850hPa 平均涡度相关系数为-0.26, 置信度超过 95%, 而相对强度指数与区域 850hPa 平均涡度相关系数为-0.65, 置信度超过 99%, 相对强度指数与副高区域 850hPa 涡度的负相关性更加显著, 相对强度指数的增加对应着副高局地环流的加强。而南北指数与区域 850hPa 涡度呈显著正相关, 相关系数为 0.53, 南北指数的增加对应着副高南侧涡度的增加, 副高南侧反气旋性环流的减弱。三类指数与 500hPa 平均涡度也存在相似特征, 相关系数分别为-0.41、-0.54 和 0.69, 相对强度指数、南北指数与 500hPa 区域平均涡度的相关性仍高于绝对强度指数, 相对强度指数与南北指数能更好描述副高区域系统局地的涡度变化。

表 3 副高指数与不同层次副高变化核心区域 (15°N - 25°N , 120°E - 140°E) 平均涡度的相关系数

Table 3 correlation coefficient between WPSHI and relative vorticity averaged over core region of WPSH (15°N - 25°N , 120°E - 140°E) in different levels

	绝对强度指数	相对强度指数	南北指数
850hPa 涡度	-0.26*	-0.65**	0.53**
500hPa 涡度	-0.41**	-0.54**	0.69**

*代表相关系数置信度超过 95%

**代表相关系数置信度超过 99%

副高指数与北半球 500hPa 位势高度及扰动位势高度的相关系数如图 3 所示。由图 3a 反映的绝对强度指数与位势高度的相关系数可知, 北半球中低纬的位势高度与绝对强度指数呈正相关, 中低纬地区的位势随着绝对强度指数的增长而增长。而分析相对强度指数与位势的相关性发现 (图 3b), 位势高度与相对强度指数在我国北方、阿留申地区以及北大西洋上空呈现显著负相关, 指数的增长意味着这些地区位势的降低。在东亚的中低纬地区, 相关系数呈现“+、-”的南北分布。在南北指数下 (图 3c), 该指数与 500hPa 位势高度在 120°E 经线方向由南到北依次呈显著的“-、+、-、+”的分布, 这与 EAP 遥相关所呈现的状况一致。图 3d 所描绘的绝对强度指数与扰动位势高度的相关系数在东西半球呈现显著的正负对称分布, 随着绝对强度指数的增长, 500hPa 扰动位势在亚欧大陆的中纬地区呈现上升的趋势, 而在北太平洋-美洲大陆的中纬度地带呈现下降的趋势。在相对强度指数下 (图 3e), 相比于图 3b, 该类指数与扰动位势高度的相关系数更加显著, 在副热带太平洋地区为正相关, 而在欧洲西部以及亚洲东岸的中纬地区呈现负相关, 东亚地区相关系数正负中心分布愈加明显。南北指数下 (图 3f), 指数与 500hPa 扰动位势高度的相关系数分布和图 3c 相似, 也表现出 EAP 遥相关型态, 但相对于图 3c, 南北指数与扰动位势的相关性在西北太平洋更加显著, 无论从位势高度角度还是扰动位势角度, 副高的南北移动都与 EAP 型遥相关有关。

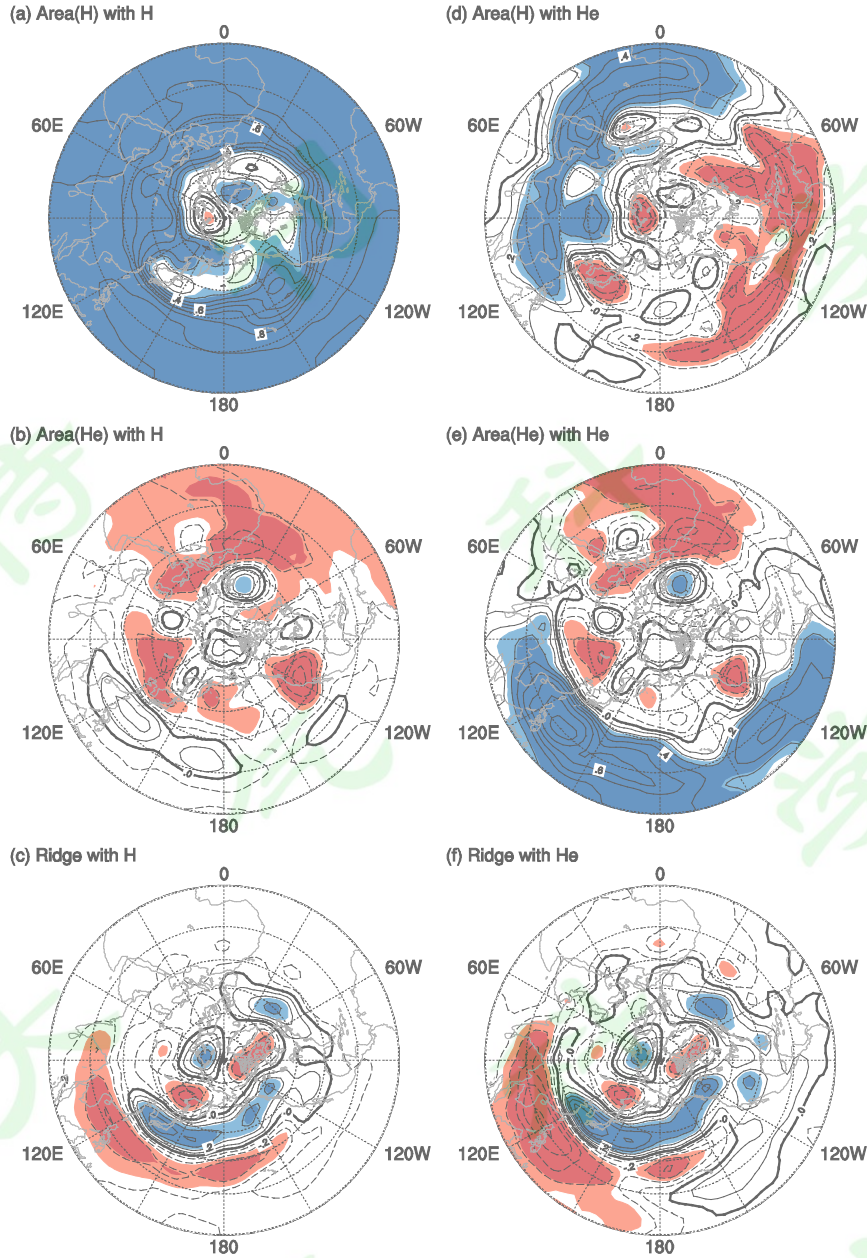


图3 (a、d) 绝对强度指数、(b、e) 相对强度指数以及 (c、f) 南北指数与 500hPa 位势高度 (左侧) 和扰动位势高度 (右侧) 的相关系数。等值线间隔为 0.1, 虚线代表相关系数为负, 粗线为相关系数 0 线。浅色 (深色) 填充代表相关系数置信度超过 95% (99%) 的区域

Fig.3 Correlation coefficient between (a, d) ASI, (b, e) RLI, (c, f) NSI and 500hPa H (left panel), He (right panel). The interval of the contour is 0.1. Negative values are showed by dashed lines and 0 lines are overstriking. Area shaded by light (dark) colors represent the correlation coefficient above 95% (99%) confidence level

进一步计算各类副高指数与 EAP 指数 (Huang, 2014) 的相关系数 (表 4) 可得, 三类副高指数与 EAP 型遥相关都存在较强的联系。在这之中, 绝对强度指数和相对强度指数与 EAP 指数之间相关系数分别为-0.46、-0.33, 置信度超过 99%, 这表明无论是绝对强度指数的增加, 还是相对强度指数的增加, 其都有利于南海北部位势的上升以及日本海地区位势的

下降。南北指数与 EAP 指数之间相关系数为 0.47，置信度也超过 99%，表明副高脊线的偏北有利于南海北部位势的下降以及日本海地区位势的上升。去除年代际趋势后，三类指数与 EAP 指数之间的相关系数分别为-0.41、-0.48、0.45，置信度都超过 99%，说明三类指数与 EAP 型遥相关之间的联系主要集中在年际尺度上。

表 4 副高指数与 EAP 指数之间的相关系数，括号中数值表示去除年代际趋势后的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between WPSHI and EAP indice. The values in brackets indicate the correlation coefficient after removing decadal trend

指数	绝对强度指数	相对强度指数	南北指数
EAP 指数	-0.46 (-0.41)	-0.33 (-0.48)	0.47 (0.45)

EAP 型遥相关是影响东亚地区降水最为重要的大气环流特征 (Huang, 2014; 黄荣辉等, 2011)，对比三类指数与 EAP 型遥相关之间的关系可以发现，绝对强度指数、南北指数与 EAP 指数的相关性要优于相对强度指数，绝对强度指数、南北指数能更好表征东亚地区 EAP 型遥相关的变化。由前文所述，相对强度指数部分去除了区域平均的年际-年代际信号，即全球增暖信号，而这种信号的滤除或许是相对强度指数与 EAP 的联系较弱的原因，这在后文中也可以体现，相对强度指数无论处于偏强还是偏弱时，日本海地区皆受气旋性异常影响。

4 副高指数与中国东部夏季降水关系以及对应的环流异常分析

4.1 不同副高指数与中国东部夏季降水关系

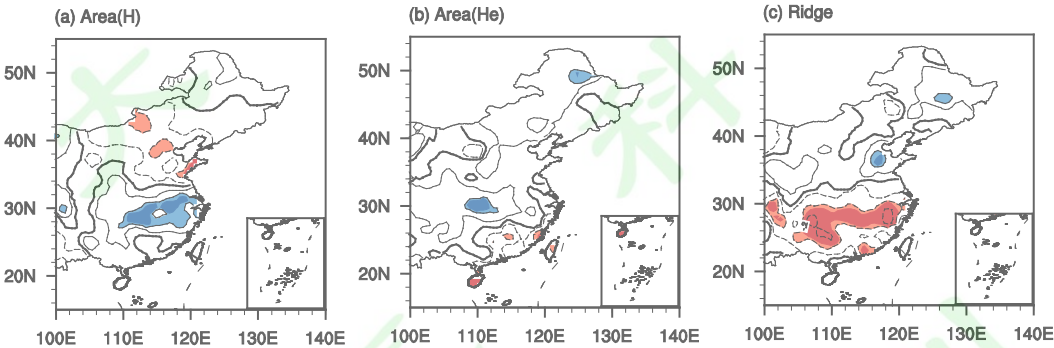


图 4 (a) 绝对强度指数、(b) 相对强度指数以及 (c) 南北指数与中国降水距平百分率相关系数。等值线间隔为 0.1，虚线表示相关系数为负，粗线为相关系数 0 线，浅色（深色）填充代表相关系数置信度超过 90%（95%）的区域

Fig.4 Correlation coefficient between (a) ASI, (b) RLI, (c) NSI and precipitation anomaly percentage. The interval of the contour is 0.1. Negative values are showed by dashed lines and 0 lines are overstriking. Area shaded by light (dark) colors represent the correlation coefficient above 90% (95%) confidence level

图 4 所示为上文中的 3 类副高指数与我国夏季降水的相关系数分布图。从图 4a 中可以看到，绝对强度指数与我国长江中下游地区的降水呈现显著的正相关，与华北地区降水呈负相关，这些表明随着位势高度角度下副高的加强西伸，长江中下游地区的降水有所增加，华北降水将会减少。相对强度指数仅与长江中游小部分区域降水表现出显著的正相关，而与华北降水将会减少。南北指数仅与长江中游小部分区域降水表现出显著的正相关，而与华北降水将会减少。

南地区表现为负相关（图 4b），在扰动位势的角度，副高相对强度的增强也会使长江流域表现为多雨，华南降水显著减少。而在南北指数与我国夏季降水相关系数分布图中（图 4c），南北指数与我国江南地区以及西南地区表现出显著的负相关，与华北表现出正相关。这表示，当副高处于偏北的状态时，我国雨带位于华北地区，长江以南的地区表现为少雨的状态。这些结果与之前的研究所得到的结果相似（He et al., 2001；Ren et al., 2013）。由前文的论述可知，绝对强度指数包含了区域的变暖信号，且对东亚区域 EAP 型遥相关表征较强；而相对强度指数部分的去除了全球增暖信号，其放大了副高系统局地的强度变化，但其与 EAP 型遥相关之间的关系被削弱，这也导致了相对强度指数与中国东部降水关系偏弱。

为探讨不同指数下雨带所处位置不同的原因，在接下来的部分中，我们选取各类指数数值最大（最小）的 8 年进行合成分析，对比各类指数变化对应的大气环流变化，年份选取由表 2 列出。

4.2 不同副高指数对应的中低层大气环流异常

如图 5 所示，在绝对强度指数偏大的情况下（图 5a），东亚雨带位于我国长江流域，降水在长江中下游地区、江南北部显著增多，这与图 4a 得到结论相同。同时内蒙古中部降水显著减少，华北地区以及华南沿海呈现微弱的少雨的状况。在绝对强度指数偏小的情况下（图 5d），雨带位于我国北方，降水差异最明显的位于内蒙古地区，长江以南的广大区域降水显著减少。

从环流异常来看，当绝对强度指数偏大时，在 500hPa 高度场上，由于全球变暖的影响，东亚位势整体呈显著上升状态（图 5b）。850hPa 风场上，亚洲东岸存在反气旋性与气旋性环流的异常偶极子对，其中反气旋异常位于我国南海北部，气旋异常位于日本海地区。贝加尔湖西南侧也存在着反气旋异常。这些异常环流的共同影响使我国北方受偏北风控制，有利于冷空气的南下。从水汽输送角度来看（图 5c），北方地区表现出异常偏北的水汽输送，且北方地区东部存在水汽通量的辐散，表明副高绝对强度增强时，向北运输的水汽减少。在南方，来自南海的水汽补充了孟加拉湾水汽输送的减弱，同时南北两支异常的水汽输送在长江流域辐合，这些因素都有利于形成长江流域多雨、北方少雨的状况。当绝对强度指数偏小时，500hPa 东亚位势整体偏低（图 5e），仅从位势变化无法得出副高的相对变化，这与前文得到的绝对强度指数无法表征系统的相对变化的观点一致。而在 850hPa 我国东部地区受异常偏南气流影响，贝加尔湖西南侧转变为气旋式异常环流，偏南风的增强有利于季风降水向北的推进。在水汽输送异常上也可看到，来自孟加拉湾的水汽经我国西南地区一直向北输送，异常水汽通量在华北辐合（图 5f），我国降水易出现北涝南旱的形势。从图 5 风场来看，绝对强度指数下，东亚地区 EAP 型遥相关变化明显，因此降水也存在明显差异，绝对强度指数与中国东部降水关系较好。

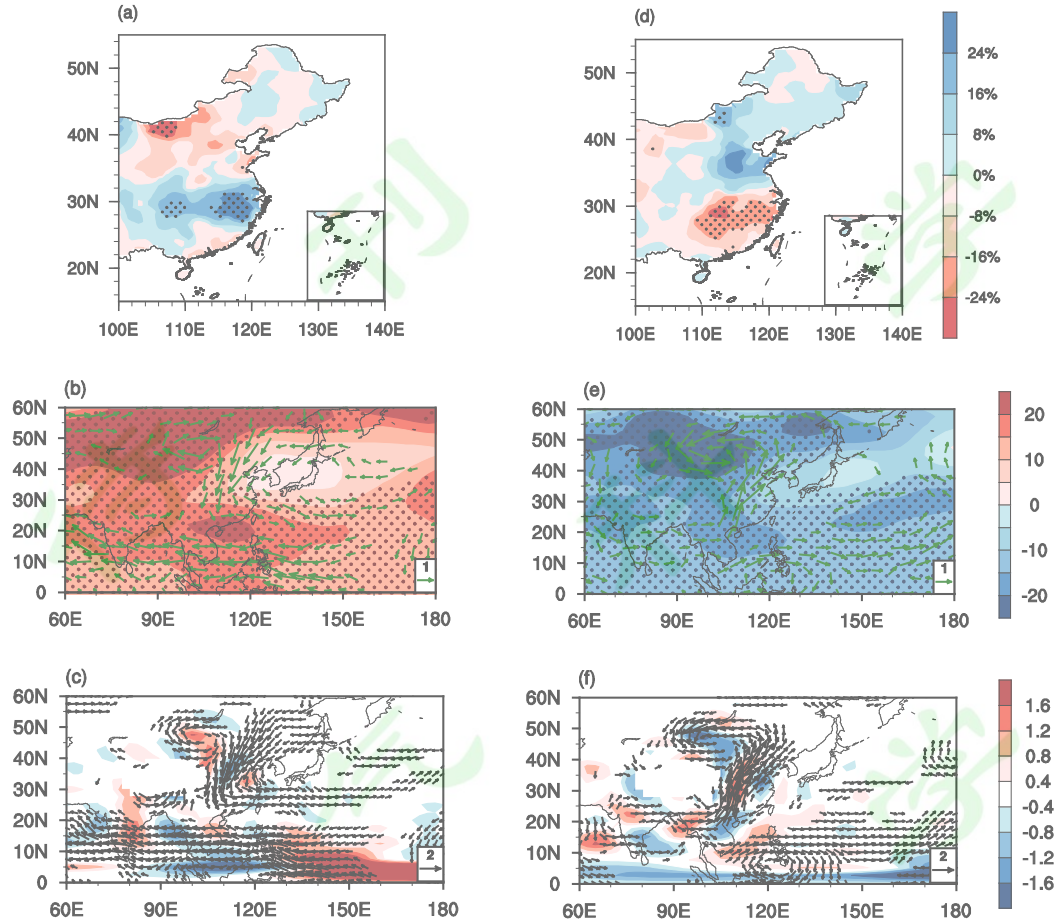


图5 (a-c) 绝对强度指数中指数数值最高的8年和(d-f) 数值最低的8年(a、d) 降水距平百分率(填充)、(b、e) 500hPa 高度场异常(填充, 单位: gpm) 与 850hPa 风场异常(绿色矢量, 单位: m/s) 以及(c、f) 850hPa 水汽通量异常(黑色矢量, 单位: $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$) 与水汽通量散度异常(填充图, 单位: $10^{-8} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$) 合成图。其中 a、d 中加点区域表示降水距平百分率置信度超过 90% 的区域。b、e 中加点区域表示高度场异常置信度超过 90%, 850hPa 风速小于 0.5m/s 的未绘出。c、f 中异常水汽通量小于 $0.5 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ 的异常水汽通量未绘出

Fig.5 Composites of (a, d) summer precipitation anomaly percentage (shading), (b, e) 500hPa H anomalies (shading, unit: gpm) with 850hPa wind anomalies (green vector, unit: m/s), and (c, f) 850hPa vapor flux anomalies (black vector, unit: $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$) with vapor flux divergence anomalies (shading, unit: $10^{-8} \text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$) in (a-c) the highest 8 years and (d-f) the lowest 8 years under ASI. Precipitation anomaly percentage above 90% confidence level in (a, d) and H anomaly above 90% confidence level in (b, e) are dotted. 850hPa wind speed below 0.5m/s in (b, e) and vapor flux below $0.5 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{hPa})$ in (c, f) are omitted

相对强度指数变化时降水距平百分率合成与大气环流状况如图 6 所示。在相对强度指数偏大时, 我国雨带仍处于长江流域, 但相比于绝对强度指数偏大时, 显著变化区位于长江中游(图 6a)。在相对强度指数偏小时, 我国雨带位于长江以南的广大区域, 长江以北降水减少(图 6d)。从环流场上看, 在相对强度指数偏大时, 500hPa 扰动位势(图 6b)在我国南方地区显著偏高, 最大中心位于我国南海地区, 日本海地区扰动位势显著降低。850hPa 上,

同绝对强度偏大时大气环流异常类似，东亚沿岸为反气旋性与气旋性异常偶极子对。水汽输送上（图 6c）依然表现为南方补充的偏南水汽输送与北方偏北的水汽输送在长江流域汇合，但相比绝对强度偏大时（图 5c）辐合区域偏西，因此雨带主要位于长江中游。而相对强度指数偏小时，500hPa 扰动位势（图 6e）在菲律宾地区显著偏低，而在贝加尔湖以及堪察加半岛东部显著偏高。850hPa 上贝加尔湖西南侧呈反气旋环流异常，而我国东部由南往北皆受偏北风异常控制。与之对应的是，运输进入我国的水汽通量显著减少（图 6f），华南地区水汽辐合异常增加。这种环流型配置促进了长江以北偏干局面的形成。相比于位势高度，扰动位势高度与风场的变化有较好对应，但扰动位势在滤除区域增暖信号的同时也削弱了环流中的 EAP 型遥相关信号，这在 EAP 的关键区之一日本海附近尤为明显，在指数偏低与偏高的情况下都表现为气旋性环流，在这种异常环流下，北方降水差异并不明显，相对强度指数与中国东部夏季降水关系较弱。

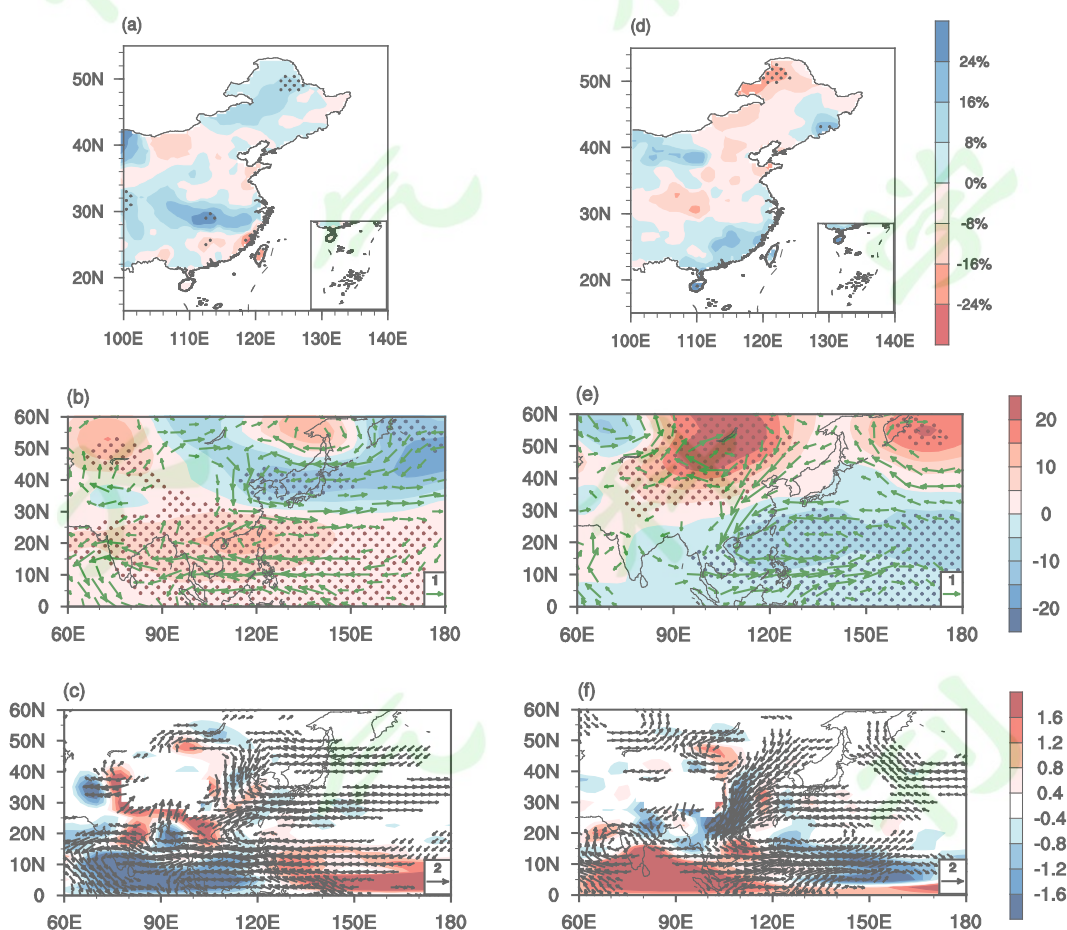


图 6 同图 5，但为相对强度指数。b、e 填色图为对应时期扰动位势高度异常（单位：gpm）合成

Fig.6 Same as Fig.5, but for RLI. Shaded area in (b, e) stand for the composites of 500hPa He (unit: gpm)

在图 7 中我们可以发现，当南北指数偏大时，东亚雨带位于华北地区，江淮以及江南地区呈现显著的干旱状态（图 7a）。而当南北指数偏小时，我国多雨区主要位于华南地区，长江、黄河流域表现为一致偏干（图 7d）。从异常环流背景来看，在副高偏北的状态下，500hPa 位势高度在东亚沿岸由南往北存在“-、+、-”的显著异常，低层 850hPa 大气环流异常同

500hPa 一致，在东亚沿岸有南往北依次为气旋性-反气旋性-气旋性环流异常，这种环流型使我国长江以北的地区受偏南风控制（图 7b）。在异常水汽通量场上可以看出，来自孟加拉湾的水汽有所增加，大量水汽向我国北方运输，而长江流域表现异常偏东风的水汽输送，说明长江中下游地区向东输送的水汽减少（图 7c），这些造成了长江流域降水的减少以及华北降水的增加。当南北指数偏小时，亚洲东岸 500hPa 位势高度表现出与指数偏大时相反的状况，由南往北依次为异常的高压-低压-高压。在 850hPa 上，低纬地区的反气旋异常明显，风场在长江以南地区存在明显的偏南风异常，气旋式环流异常位于日本以东（图 7e）。无论是 500hPa 还是 850hPa，东亚环流都表现为明显的 EAP 型的遥相关型态。水汽场上，副高南侧向我国运输的西南水汽输送增强，但这支补充的水汽经过华南往东运输，北方水汽通量变化很小（图 7f），这种水汽输送方式使得降水在华南偏多。

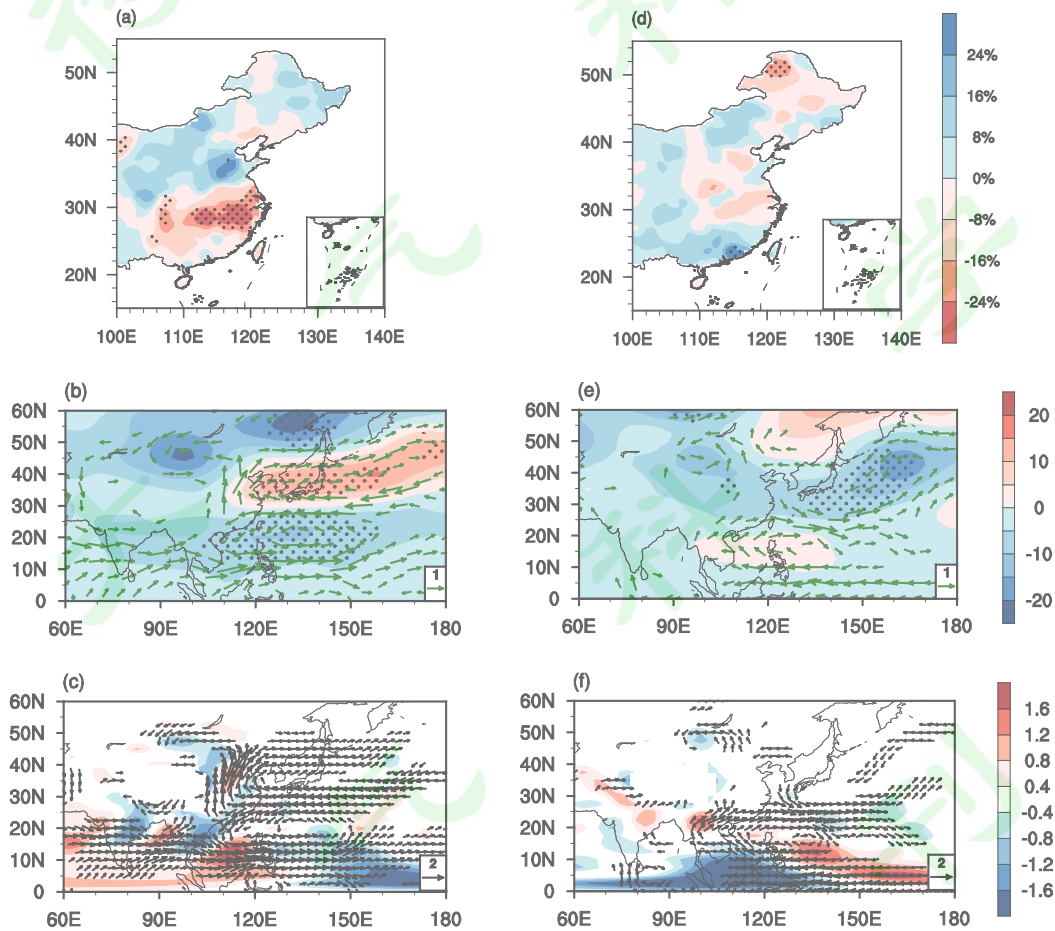


图 7 同图 5，但为南北指数

Fig.7 Same as Fig.5, but for NSI

4.3 不同副高指数对应的高层大气环流异常

除了中低层环流，高层环流系统的差异同样也为东亚地区降水形势的变化提供背景。不同指数对应的 200hPa 纬向风场变化如图 8-10 所示。由图 8 可知，在绝对强度指数偏高时（图 8a），200hPa 西风急流轴位于 40° N 的地区，中心风速达 30m/s 以上。在绝对强度指数偏小时（图 8c），虽然急流中心风速也在 30m/s 以上，但急流轴略微北移，且相对指数偏

大时，低纬东风急流加强。这些特征在纬向风异常图上也有很好体现，在绝对强度指数偏高时（图 8b）， 40°N 以南西风风速有所加强，而 40°N 以北为异常东风。与此同时，在亚洲东岸由南往北存在西风-东风-西风-东风的纬向风异常，这与 EAP 遥相关一致。在绝对强度指数偏小时，东亚 200hPa 的纬向风异常基本与副高偏强时相反（图 8d）。此外，在纬向风异常图上还可以看出， 20°N 以南的东风距平与 20°N 以北的西风距平的共同作用，使我国南方高层存在反气旋式异常，副高上下层变化一致。

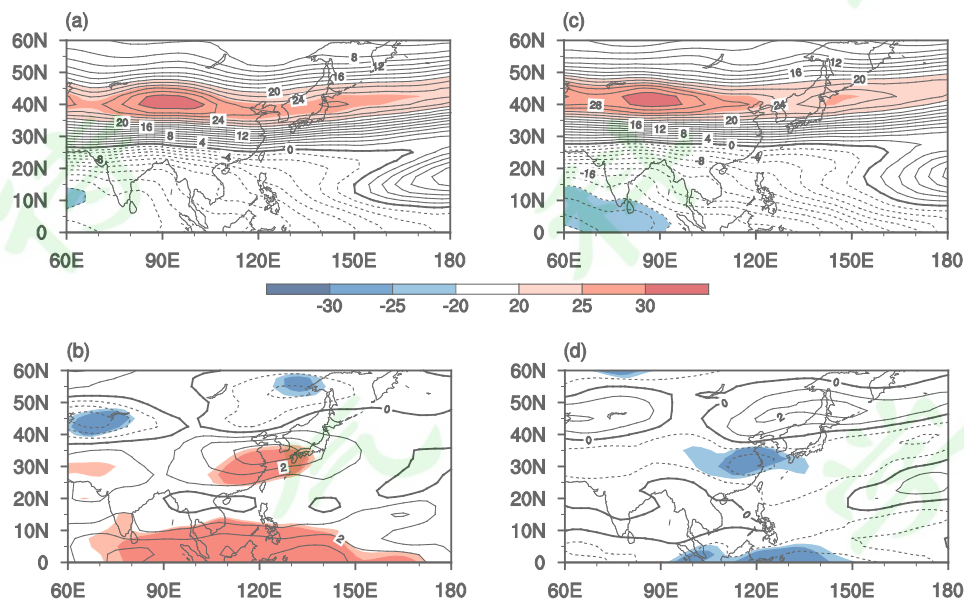


图 8 （a、b）绝对强度指数中指数数值最高的 8 年和（c、d）数值最低的 8 年（a、c）200hPa 纬向风场（单位：m/s）分布与（b、d）纬向风异常合成。a、c 中等值线间隔为 2m/s，超过 20m/s 的区域已填色绘出。b、d 中等值线间隔为 1m/s，浅色（深色）填充表示纬向风差异通过显著性水平为 90%（95%）的区域。

Fig.8 Composites of (a, c) 200hPa zonal wind and (b, d) anomalous zonal wind in (a, b) the highest 8 years and (c, d) the lowest 8 years under ASI. In (a, c), the contour interval is 2m/s and wind speed over 20m/s are highlighted. In (b, d), the contour interval is 1m/s and area shaded by light (dark) colors represent the zonal wind anomalies above 90% (95%) confidence level

相对强度指数所对应的高层急流状况如图 9 所示。在相对强度指数偏大时（图 9a），西风急流轴位于 40°N 的纬线上，中心风速超过 34m/s。而在相对强度指数偏小时（图 9c），西风急流中心强度明显减弱，中心风速仅达 32m/s。与此同时，急流轴也北移至 43°N 左右。纬向风异常图上，相对强度指数偏大的年份中（图 9b）， 30°N - 40°N 的纬度带西风明显增强，低纬地区东风明显减弱。在这种异常环流态下，亚洲高层反气旋环流——南压高压得到加强。另外还可以看到，相对于绝对强度指数大值年，相对强度指数大值年的西风异常中心区偏西，与降水显著增加区域的西移（图 6a）有很好的对应。在相对强度指数偏低的年份（图 9d），西风急流中心相较于气候态略微减弱，相较于高指数时期环流变化不明显，但青藏高原上空出现显著的东风异常以及南海地区的西风异常寓示着夏季南亚高压的减弱。

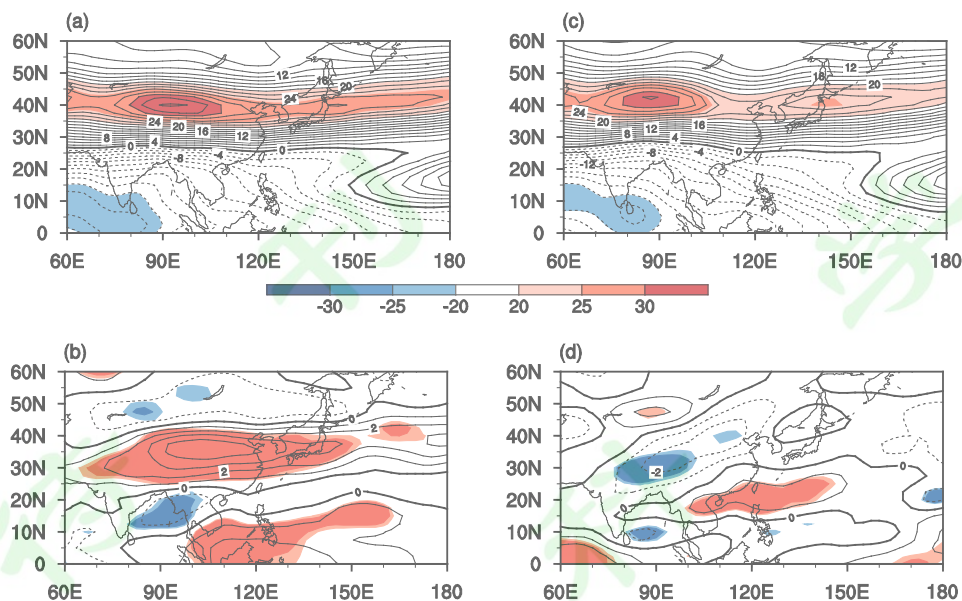


图 9 同图 8，但为相对强度指数

Fig.9 Same as Fig.8, but for RLI

图 10 所描述的是南北指数不同时期东亚高层环流状况。在南北指数偏大的时期，也就是副高偏北时(图 10a)，高层西风急流中心轴位于 40°N - 45°N 之间，中心风速超过 32m/s 。但当副高偏南时(图 10c)，西风急流带整体位置南移，强度上明显减小，中心风速仅达 30m/s 。而在 200hPa 纬向风异常图上可以得知，副高偏北时(图 10b)，亚洲东岸表现出类似于 EAP 遥相关型特征，风速变化最显著的区域位于我国东部沿岸，由南往北依次为西风、东风、西风以及东风异常。而在副高偏南的年份(图 10d)，东亚环流状况与副高偏北时呈现反位相特征。

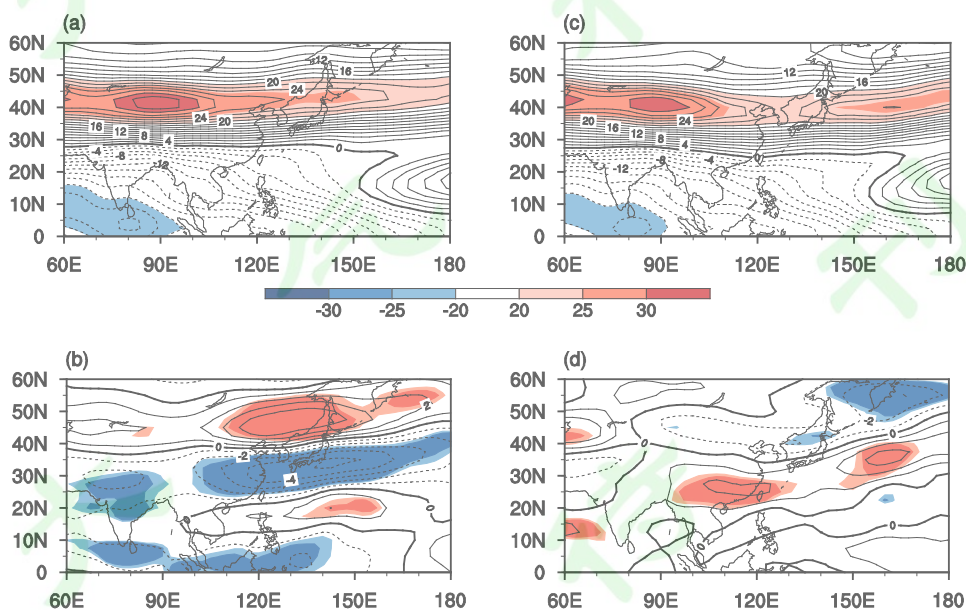


图 10 同图 8，但为南北指数

Fig.10 Same as Fig.8, but for NSI

对比三种指数可以发现, 各指数下高层纬向风场的变化都与 EAP 模态存在一定关系, 但绝对强度指数下高层变化最显著出现在低纬地区, 而其他两类指数对应的高层环流在 30°N 附近变化最大。

5 结论与讨论

本文利用中国夏季降水资料以及各层次大气环流信息, 研究了不同副高指数之间的异同以及各指数与我国降水之间的关系。为探求降水分布型改变的原因, 本文进一步对大气环流的变化特征进行分析。所得到的结论如下:

- (1) 本文所探讨的副高指数可以分为 3 类: 一是表征副高绝对强度变化的绝对强度指数; 二是表征副高相对强度变化的相对强度指数; 三是表征副高南北位置变化的南北指数。在这其中, 绝对强度指数的上升趋势与 500hPa 高空 5870gpm 等值线逐年扩张一致; 相对强度指数表现出的下降趋势与扰动位势高度 0gpm 等值线不断缩小有关; 而南北指数的波动表明, 副高脊线基本围绕 25°N 南北振荡。相比于绝对强度指数, 相对强度指数去除了热带大气中区域平均的部分年际-年代际信号, 而这种年际-年代际信号可归功于全球变暖影响。
- (2) 对于副高局地而言, 相对强度指数与副高局地涡度的相关性要优于绝对强度指数, 这说明, 绝对强度指数并不能较好的描述副高局地的涡度变化, 相对强度指数能更好描述副高局地的涡度变化。而对于与东亚降水最为重要的遥相关——EAP 型遥相关, 尽管绝对强度指数与相对强度指数都同 EAP 型遥相关有一定联系, 但绝对强度指数与 EAP 型遥相关的关系要优于相对强度指数, 相对强度指数在滤除部分增暖信号的同时也削弱了环流中的 EAP 型遥相关信号。南北指数对副高局地涡度变化以及 EAP 型遥相关都有较好表述。
- (3) 从副高指数与降水关系的分析以及对应环流变化可以看出, 绝对强度指数与东亚 EAP 型遥相关有较好的关系, 致使其能较好表征中国东部降水变化, 该指数与长江流域降水存在高相关, 在绝对强度指数大值年, 位于日本海的气旋环流促使北方产生偏北风, 华北地区干旱, 而长江流域气流辐合, 降水增加; 指数偏小时, 我国降水型与之相反。相对强度指数与 EAP 型遥相关之间的关系相对较弱, 无论指数偏低还是偏高的情况下日本海地区都表现为气旋性环流, 因此其与中国东部夏季降水的关系也相对较弱, 指数偏大时, 长江流域的显著位于长江中游, 这与低层水汽辐合中心以及高层西风异常中心的加强西移有关; 指数偏小时, 大陆整体受偏北风控制, 降水集中在华南地区。南北指数与 EAP 型遥相关也存在较好的关系, 其与长江以南的降水变化有较好对应, 南北指数偏大时, 我国长江以北的地区受偏南风控制, 东亚雨带位于华北地区; 而指数偏小时, 我国仅在华南有水汽补充, 降水集中于我国华南地区。

接下来的部分将对指数变化趋势的原因进行讨论。Wang 等 (2013) 发现, 绝对强度指

数的增加（即副高的增强）可能与赤道西太平洋至印度洋一带海温的增暖有关，这种海温的变化促使热带大气产生 ENSO 类似的响应，西北太平洋地区受异常反气旋环流控制。对温度的分析发现，200hPa 以下副高控制区的温度都呈正相关，且低层正相关性更加显著（图略），而这种上下一致的增暖（即全球增暖信号）可导致位势高度下副高的加强。而对相对强度指数，由相对强度指数与热带地区对流层上层扰动温度的相关系数（图 11a）可知，这两者之间的相关系数沿赤道呈现南北对称分布，相对强度指数与印度洋-西太平洋上空的扰动温度呈负相关，而与美洲-大西洋一带的扰动温度呈正相关。同时可以注意到相对强度指数与副高控制区域内的扰动温度负相关显著（图 11b），两者之间的相关系数为-0.54，置信度超过 99%，即副高控制区对流层上层扰动温度的上升有利于相对强度指数的下降。由气压高公式可知，副高区域内对流层上层扰动温度的上升，有利于对流层上层的膨胀，使得 500hPa 扰动位势下降。去趋势后，两者之间的相关系数为-0.5，也通过了置信度为 99%的 t 检验。但为什么副高控制区扰动温度会存在增加的趋势，考虑到问题的复杂程度，本文暂时无法解释。

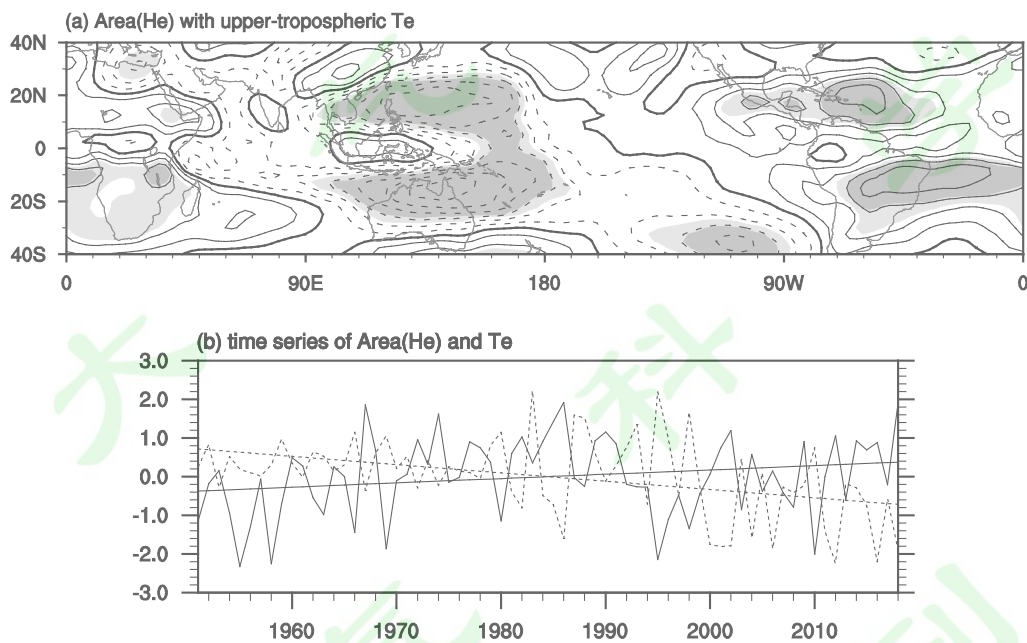


图 11 (a) 相对强度指数与热带地区对流层上层 (500-200hPa) 夏季平均扰动温度相关系数，等值线间隔为 0.1，虚线表示相关系数为负，相关系数 0 线已加粗，浅色（深色）填充表示相关系数置信度超过 95% (99%); (b) 标准化的相对强度指数（虚线）与副高核心区域内 (15°N-25°N, 120°E-140°E) 对流层上层夏季平均扰动温度（实线）时间序列

Fig.11 (a) Correlation coefficient between RLI and summer mean upper-tropospheric (500-200 mb) eddy temperature over tropical region. The interval of the contour is 0.1. Negative values are dashed and 0 lines are overstriking. Area shaded by light (dark) colors represent the correlation coefficient above 95% (99%) confidence level; (b) Normalized time series of RLI (dashed line) and summer mean upper-tropospheric eddy temperature in WPSH core region (15°N-25°N, 120°E-140°E)

有关副高区域扰动位势为什么表现下降的问题值得进行深入讨论。对副高强度的讨论,本文也仅仅从位势高度以及扰动位势两个角度来探讨其对中国东部降水的影响,与此同时,也有作者从相对涡度以及风场入手来定义副高强度指数,本文并没有将此纳入讨论,这些都需要后续工作来展开探讨。

参考文献

- 蔡学湛, 高建芸, 吴滨. 2003. 夏季东亚季风与西太平洋副高对福建旱涝影响的诊断分析[J]. 应用气象学报, 14(3): 322-330. Cai Xuezhan, Gao Jianyun, Wu Bin. 2003. Impact of East Asian Summer Monsoon and Subtropical Anticyclone over Western Pacific on Droughts/Floods in Fujian. Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese), 14(3): 322-330.
- 高辉, 丁婷, 李维京. 2017. 三维副热带高压强度指数及对中国东部雨带异常表征的改进[J]. 科学通报, 62(31): 3643-3654. Gao Hui, Ding Ting, Li Weijing. 2017. The three-dimension intensity index for western Pacific subtropical high and its link to the anomaly of rain belt in eastern China[J]. Chinese Science Bulletin(in Chinese), 62(31): 3643-3654.
- Gao Hui, Jiang Wei, Li Weijing. 2015. Changed relationships between the East Asian summer monsoon circulations and the summer rainfall in eastern China[J]. Journal of Meteorological Research, 28(6): 1075-1084.
- He Chao, Lin Ailan, Gu Dejun, et al. 2018. Using eddy geopotential height to measure the western North Pacific subtropical high in a warming climate[J]. Theoretical and Applied Climatology, 131(1-2): 681-691.
- He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. 2001. Vertical Circulation Structure, Interannual Variation Features and Variation Mechanism of Western Pacific Subtropical High[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18(4): 497-510.
- He Xuezhao, Gong Daoyi. 2002. Interdecadal change in Western Pacific Subtropical High and climatic effects[J]. Journal of Geographical Sciences, 12(2): 202-209.
- Hu Zengzhen, Yang Song, Wu Renguang. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals[J]. Journal Of Geophysical Research, 108(D19): 4614.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. 大气科学, 35(4): 589-606 HUANG Ronghui, CHEN Jilong, LIU Yong. 2011. Interdecadal Variation of the Leading Modes of Summertime Precipitation Anomalies over Eastern China and Its Association with Water Vapor Transport over East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(4): 589-606
- 黄士松. 1963. 副热带高压的东西向移动及其预报的研究[J]. 气象学报, 33(3): 320-332. Huang Shisong. 1963. A Study of Longitudinal Movement and Its Forecasting of Subtropical Anticyclone[J]. Acta Meteorologica Sinic(in Chinese), 33(3): 320-332.
- Huang Gang. 2014. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21(1): 41-52.
- Huang Gang, Hu Kaiming, Xie Shangping. 2010. Strengthening of Tropical Indian Ocean

- Teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An Atmospheric GCM Study[J]. *Journal of Climate*, 23(19): 5294-5304.
- Huang Ronghui. 1992. The East Asia/Pacific Pattern Teleconnection of Summer Circulation and Climate Anomaly in East Asia[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6(1): 25-37.
- Huang Yanyan, Li Xiaofan. 2015. The Interdecadal Variation of the Western Pacific Subtropical High as Measured by 500 hPa Eddy Geopotential Height[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8(6): 371-375.
- Huang Yanyan, Wang Bin, Li Xiaofan, et al. 2017. Changes in the influence of the western Pacific subtropical high on Asian summer monsoon rainfall in the late 1990s[J]. *Climate Dynamics*, 51(1-2): 443-455.
- Jiang Dabang, Wang Huijun. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(17): 1923-1929.
- Kalnay Eugenia, Kanamitsu M., Kistler R., et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77 (3): 437-470.
- Lee June-Yi, Kwon MinHo, Yun Kyung-Sook, et al. 2017. The long-term variability of Changma in the East Asian summer monsoon system: A review and revisit[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53(2): 257-272.
- 刘屹岷, 吴国雄. 2000. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识[J]. *气象学报*, 58(4): 500-512. Liu Yiming, Wu Guoxiong. 2000. Reviews on The Study of The Subtropical Anticyclone and New Insights On Some Fundamental Problems[J]. *Acta Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 58(4): 500-512.
- 刘芸芸, 李维京, 艾(子兑)秀, 等. 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. *应用气象学报*, 23(4): 414-423. Liu Yunyun, Li Weijing, Ai Manxiu, et al. 2012. Reconstruction and Application of the Monthly Western Pacific Subtropical High Indices[J]. *Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese)*, 23(4): 414-423.
- Lu Riyu. 2002. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19(6): 1004-1028.
- 罗绍华, 金祖辉. 1986. 南海海温变化与初夏西太平洋副高活动及长江中、下游汛期降水关系的分析[J]. *大气科学*, 10(4): 409-418. Luo Shaohua, Jin Zuhui. 1986. Statistical analyses for sea surface temperature over the South China Sea, behavior of subtropical high over the west Pacific and monthly mean over the Changjiang middle and lower reaches[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 10(4): 409-418.
- Nitta T. 1987. Convective Activities in the Tropical Western Pacific and Their Impact on the Northern Hemisphere Summer Circulation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 65(3): 373-390.
- Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Sun Xuguang. 2013. Zonal Oscillation of Western Pacific Subtropical High and Subseasonal SST Variations during Yangtze Persistent Heavy Rainfall Events[J]. *Journal of Climate*, 26(22): 8929-8946.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化[J]. *大气科学*, 34(3): 611-628. SU Tonghua, XUE Feng. 2010. The Intraseasonal Variation of Summer Monsoon Circulation and Rainfall in East Asia[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(3): 611-628.

- Sui Chung-Hsiung, Chung Pei-Hsuan, Li Tim. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high[J]. *Geophysical Research Letters*, 34(11): L11701.
- 陶诗言. 1963. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1-146. Tao Shiyang. 1963. Some Studies on Subtropical Synoptic Systems over China in Summer[M]. Beijing: Science Press, 1-146.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. *应用气象学报*, 17(5):513-525. Tao Shiyang, Wei Jie. 2006. The Westward, Northward Advance of the Subtropical High over the West Pacific in Summer[J]. *Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese)*, 17(5): 513-525.
- Wang Bin, Xiang Baoqiang, Lee June-Yi. 2013. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 110(8): 2718-2722.
- Wang Huijun. 2001. The Weakening of the Asian Monsoon Circulation after the End of 1970's[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(3): 376-386.
- Wu Liguang, Wang Chao. 2015. Has the Western Pacific Subtropical High Extended Westward since the Late 1970s?[J]. *Journal of Climate*, 28(13): 5406-5413.
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副高北跳西伸的可能机制[J]. *应用气象学报*, 12(2): 150-158. Xu Haiming, He Jinhai, Zhou Bin. 2001. the Features of Atmospheric Circulation during Meiyu Onset and Possible Mechanisms for Westward Extension (Northward Shift) of Pacific Subtropical High[J]. *Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese)*, 12(2): 150-158.
- Yang Hui, Sun Shuqing. 2003. Longitudinal displacement of the subtropical high in the western Pacific in summer and its influence[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20(6): 921-933.
- Yang Hui, Sun Shuqing. 2005. The characteristics of longitudinal movement of the subtropical high in the western Pacific in the pre-rainy season in South China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22(3): 392-400.
- Yang Ruowen, Xie Zhiang, Cao Jie. 2017. A Dynamic Index for the Westward Ridge Point Variability of the Western Pacific Subtropical High during Summer[J]. *Journal of Climate*, 30(9): 3325-3341.
- 张玲, 智协飞. 2010. 南亚高压和西太副高位置与中国盛夏降水异常[J]. *气象科学*, 30(4): 438-444. Zhang Ling, Zhi Xiefei. 2010. South Asian High and the Subtropical Western Pacific High and its Relation to the Mid-summer Precipitation anomalies over China[J]. *Scientia Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 30(4): 438-444
- 周静亚, 杨大升, 黄嘉佑. 1986. 夏季热带及副热带环流系统周期振荡与中国降水的功率谱分析[J]. *热带气象*, 2(3): 195-203. Zhou Jingya, Yang Dasheng, Huang Jiayou. 1986. Power Spectral Analyses of Oscillation in Subtropical and Tropical Circulation Systems and The Precipitation Over East China in Summer[J]. *Journal of Tropical Meteorology(in Chinese)*, 2(3): 195-203.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong, Zhang Jie, et al. 2009. Why the Western Pacific Subtropical High Has Extended Westward since the Late 1970s[J]. *Journal of Climate*, 22(8): 2199-2215.